

1 实验 7.1 电路基础——运算放大器

1. 实验原理

运算放大器是具有差分输入且通常为单端输出的直流耦合高增益电子电压放大器。在这种配置中，运算放大器产生的输出电位（相对于电路接地）通常比其输入端子之间的电位差大 100,000 倍。理想的运算放大器，遵循以下“黄金法则”：

- (1) 在闭环中，输出尝试做任何必要的事情来使输入之间的电压差为零。
- (2) 输入不消耗电流。

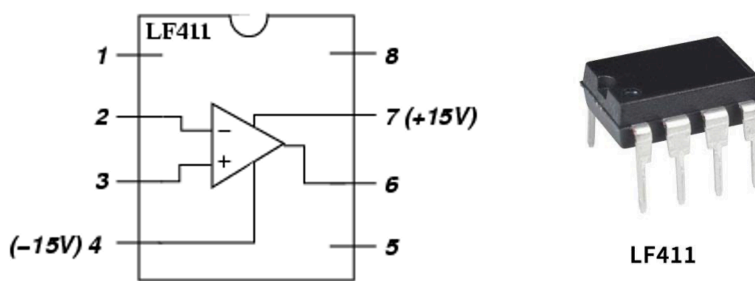


图 1: LF411

(2) 运算放大器电路

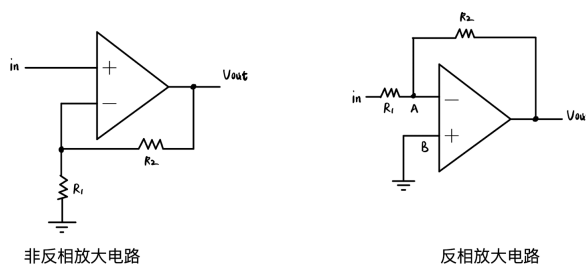


图 2:

非反相放大电路： $V_A = V_{in} = V_{out} R_1 / (R_1 + R_2)$, $gain = V_{out} / V_{in} = 1 + R_2 / R_1$

反相放大电路： $V_{out} / R_2 = -V_{in} / R_1$, $gain = V_{out} / V_{in} = -R_2 / R_1$

2. 实验过程

(1) 将 LF411 运算放大器横跨在面包版中央，用学生电源为放大器 4, 7 接口提供 $\pm 15V$ 电压（同一台仪器设置好输出后，共用一条地线，提供相对的 0V 电势）。将放大器的正输入接地，负输入端接入 $+15V$ 电源，测量并记录输出端电压。

(2) 将负输入端的输入换为 $-15V$ ，测量并记录输出电压。

(3) 将负输入端换成由分压器提供的电压，调整变阻器的阻值并观察。

(4) 选取两个阻值的电阻，组成非反相放大器电路，使用 3 组电压，分别计算其理论增益值。更换 2 次电阻，重复以上操作。选取两个阻值的电阻，组成非反相放大器电路，使用 3 组电压，分别计算其理论增益值。更换 2 次电阻，重复以上操作。

(5) 选取两个阻值的电阻，组成反相放大器电路，使用 3 组电压，分别计算其理论增益值。更换 2 次电阻，重复以上操作。选取两个阻值的电阻，组成非反相放大器电路，使用 3 组电压，分别计算其理论增益值。更换 2 次电阻，重复以上操作。

3. 实验结果

(1) 放大器的正输入接地，负输入端接入 +15V 电源： $V_{out} = -12.86V$

(2) 放大器的正输入为 -15V，负输入端接入 +15V 电源： $V_{out} = -14.33V$

(3) 在调整变阻器电阻时， V_{out} 约为-12.8V 几乎不改变。在调整到某一特定位置，输出发生跳变到 14.3V 附近，之后再向该方向调整，输出几乎不变。

(4) 非反相放大器电路：

$R_1(k\Omega)$	0.994	$R_2(k\Omega)$	9.79	$R_1(\Omega)$	99.1	$R_2(\Omega)$	994	$R_1(k\Omega)$	4.98	$R_2(k\Omega)$	49.1
$V_{in}(V)$	0.297	0.496	0.696	$V_{in}(V)$	0.297	0.496	0.696	$V_{in}(V)$	0.297	0.496	0.696
$V_{out}(V)$	3.27	5.46	7.76	$V_{out}(V)$	3.21	5.22	7.35	$V_{out}(V)$	3.32	5.55	7.79
V_{out}/V_{in}	11.01	11.01	11.15	V_{out}/V_{in}	10.81	10.52	10.56	V_{out}/V_{in}	11.18	11.19	11.19
V_{out}/V_{in} 平均	11.06	V_{out}/V_{in} 理论	10.85	V_{out}/V_{in} 平均	10.63	V_{out}/V_{in} 理论	11.03	V_{out}/V_{in} 平均	11.19	V_{out}/V_{in} 理论	10.86
偏移比例	1.906%			偏移比例	-3.621%			偏移比例	3.015%		

(5) 反相放大器电路：

$R_1(k\Omega)$	5.02	$R_2(k\Omega)$	9.78	$R_1(\Omega)$	99.2	$R_2(\Omega)$	995	$R_1(k\Omega)$	4.98	$R_2(k\Omega)$	49.1
$V_{in}(V)$	0.297	0.495	0.698	$V_{in}(V)$	0.292	0.487	0.669	$V_{in}(V)$	0.295	0.491	0.669
$V_{out}(V)$	-0.583	-0.973	-1.366	$V_{out}(V)$	-2.96	-4.96	-6.91	$V_{out}(V)$	-2.91	-4.92	-6.91
V_{out}/V_{in}	-1.96	-1.97	-1.96	V_{out}/V_{in}	-10.14	-10.18	-10.33	V_{out}/V_{in}	-9.86	-10.02	-10.33
V_{out}/V_{in} 平均	-1.96	V_{out}/V_{in} 理论	-1.95	V_{out}/V_{in} 平均	-10.22	V_{out}/V_{in} 理论	-10.03	V_{out}/V_{in} 平均	-10.07	V_{out}/V_{in} 理论	-9.86
偏移比例	0.702%			偏移比例	1.861%			偏移比例	2.148%		

2 实验 7.2 电路基础——发光二极管

1. 实验原理

(1) 发光二极管的正向伏安特性曲线

根据半导体物理学，PN 结的正向电流和正向电压之间的关系： $I = I_0(e^{\frac{eU}{\eta k_B T}} - 1)$ (1)

I 是通过 PN 结的正向电流， U 是 PN 结两端的正向电压， I_0 是反向饱和电流， e 是电子电量， k_B 是玻尔兹曼常数， T 是热力学温度 η 是修正系数。常温（300K）下，指数项远大于 1，(1) 式近似为： $I = I_0 e^{\frac{eU}{\eta k_B T}}$ (2) 工程上，(2) 可以近似为线性模型，当正向电压小于 U_0 时，PN 结的正向电流趋近于 0。 I 和 U 近似为线性关系： $U = U_0 + IR$ U_0 为正向导通电压， R 为正向电阻。

主要的特性参数：

(1) 正向导通电压 U_0

当电压超过 U_0 后，正向电流随正向电压迅速增加。

(2) 正向最大电流 I_{max}

发光二极管允许通过的最大正向电流一般在 5~20mA，超过可能损毁。

(3) 正向工作电压 U

正向工作电压大于正向导通电压 U_0 ，一般在 1.4~4V。若正向电压小于这个范围，则电流极小，二极管不发光或发光微弱。

2. 实验过程

(1) 测量 LED 的伏安特性。用直流电源为 LED 直接供电，将万用表调整至电流档，串接入电路，测量工作电流。为 LED 提供 2.3~3.0 V，以 0.1 V 电压为梯度，测量记录相应电流值。

(2) 连接 LED 驱动电路，并检查确认没有短路

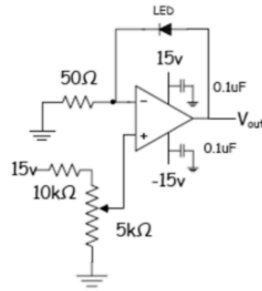


图 3: LED 驱动电路

(3) 为电路供电，并改变变阻器的阻值，观察 LED 灯亮度的变化情况

(4) 将运放输入端改为由函数发生器提供提供 0 至 4 V，频率在 10Hz 至 100 Hz 间的信号，观察 LED 灯的情况

3. 实验结果

(1) 在实验指南 PDF 中所写的 1.7-2.2V 并没有达到其正向导通电压，万用表的微安档仍测不出任何电流，经测试，确定 2.3—3.0V 的区间测量。用实验原理中提到的指数形式 $I = 0.001247e^{4.858V}$ 和线性形式 $I = 2699(V - 2.3)$ 来拟合得到的数据，发现用指数形式拟合效果更好。

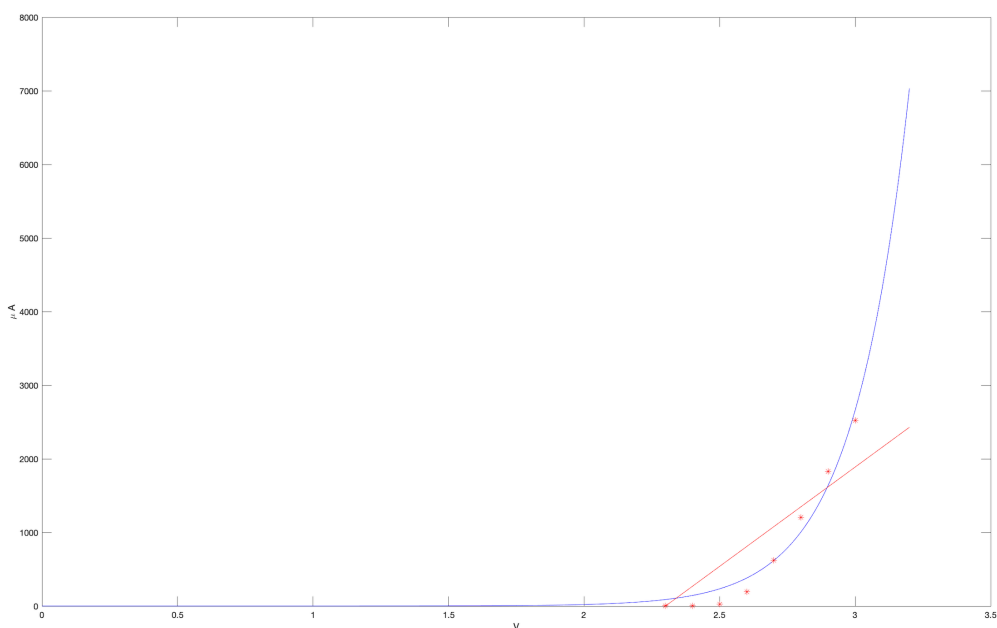


图 4: 拟合发光 LED 的伏安特性曲线

(2) 用变阻器给运放提供电压时，改变电阻，观察到 LED 的亮度发生从明到暗的单调变化。

(3) 用函数发生器给运算放大器提供信号时，发现频率不变，升高所给信号的峰峰值 LED 灯逐渐变亮；所给信号的峰峰值不变时，LED 灯闪烁频率逐渐升高，在接近肉眼认为是常亮模式前，观察到类似呼吸灯的效果，之后视觉上感到 LED 灯常亮。

3 实验 7.3 电路基础——光电二极管

1. 实验原理

光电二极管：其基础结构通常是一个 PN 结或者 PIN 结构。当一个具有充足能量的光子冲击到二极管上，它将激发一个电子，从而产生自由电子（同时有一个带正电的空穴）。这样的机制也被称作是内光电效应。如果光子的吸收发生在结的耗尽层，则该区域的内电场将会消除其间的屏障，使得空穴能够向着阳极的方向运动，电子向着阴极的方向运动，产生光电流。

2. 实验过程

(1) 使用 OPA551 运算放大器，连接 PD 电流电压-转换电路

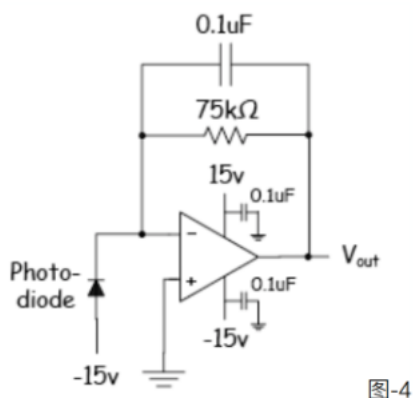


图 5: PD 电流电压-转换电路

(2) 用万用表测量运放输出端的电压，分别记录有 PD 在没有被遮挡、完全遮挡和用手机 LED 近距离提供光照时运算放大器的输出电压。

(3) 将运放输入端改为由函数发生器提供信号，在 1-3 V、1-1000 Hz 间改变函数发生器供给 LED 电路的信号，观察 PD 电路运算放大器的输出变化。

(4) 摘除 PD 电路中负反馈电容后，再重复上面的频率变化，观察 PD 电路运算放大器的输出。

3. 实验结果

(1)

	电压 (V)
环境光照	0.110
手机提供光照	2.10
完全遮光	0.024

可见，光照越强，光电二极管产生的电流越大。

(2) 运放输入端改为由函数发生器提供信号，输出电压并不稳定，但能观察到一定趋势当输入电压不变时，输入信号频率从低到高，输出电压为从小到大变化，最高值与输入电压相关，输入电压越高输出的电压越高；当输出信号的频率不变时，输入电压从低到高，猜测系统的时频响应曲线相位有提前。

(3) 在拆除负反馈电容后，输出电压仍不稳定，但能观察到一定趋势。当输入电压不变时，输入信号频率从低到高，输出电压从低升高再降低，但均大于 0；当输出信号的频率不变时，发现输入电压从低到高，输出电压最高最低数值的比值有所下降

参考文献

- [1] 维基百科. 运算放大器 [EB/OL]. [2022.10.7]. <https://zh.wikipedia.org/wiki/>
- [2] Electronic Components Datasheet Search. LF411 Datasheet (PDF) - Texas Instruments[EB/OL]. [2022.10.7]. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/27192/TI/LF411.html>.
- [3] 黄岩谊. 电子基础授课 PPT[R]. 北京大学老化学楼: 北京大学, 2022.